МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 531.01
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305

Научная статья



Разработка методов управления свойствами магнитно-реологической среды с целью регулирования жесткости звена переменной длины экзоскелета



А. О. Блинов[1], **А. В. Борисов**[1], **Л. В. Кончина**[1], **М. А. Новикова**[1], **А. В. Чигарев**[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1
[2] Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4
✉ alex-blinov67@yandex.ru

Аннотация
Введение. Статья посвящена одной из проблем создания экзоскелетов — управлению свойствами магнитно-реологической жидкости в звеньях переменной длины с регулируемой жесткостью. По исследованиям отечественных и зарубежных авторов оценена разработанность и актуальность темы. Выявлен недостаток известных моделей экзоскелетов — использование абсолютно твердых звеньев, динамика которых не передает динамику опорно-двигательного аппарата человека. Цель научных изысканий — формирование нового направления развития экзоскелетов, достаточно точно моделирующих биомеханику движений.

Материалы и методы. Рассмотрены разные состояния конструкций звеньев переменной длины с магнитно-реологической жидкостью. Отмечено, что звенья работают по принципу магнитных амортизаторов и состоят из штока с поршнем, электромагнитных катушек и корпуса, заполненного магнитно-реологической жидкостью. Визуализировано и математически представлено упорядочивающее воздействие внешнего магнитного поля на частицы магнитно-реологической жидкости. Показано значение для данной системы таких факторов, как: время, плотность зарядов, напряженность магнитного поля, а также векторы электрической и магнитной индукции, электрической напряженности и плотности электрического тока. Определен входной параметр, влияющий на поведение магнитно-реологической жидкости. Это напряженность магнитного поля. Показано, что вязкость жидкости меняется в зависимости от формы магнитных частиц (вытянутый или сплюснутый эллипсоид).

Результаты исследования. Исследованы и визуализированы зависимости, принципиальные для решения поставленной задачи. Приняты как базовые параметры напряженность магнитного поля, а также угол между вектором, направленным вдоль прямой, соединяющей центры двух микронных частиц, и вектором напряженности внешнего магнитного поля. Показано, каким образом от них зависят магнитный момент, напряжение и его антисимметричная часть. Установлено, что для управления свойствами магнитно-реологической жидкости необходимо менять:

– напряженность внешнего магнитного поля;
– угол между напряженностью внешнего магнитного поля и вектором ориентации между диполями.

Сравниваются два значения силы: для заданной конструкции звена и фиксируемые при ходьбе в голени человека. Установлена согласованность этих показателей.

Обсуждение и заключения. Результаты научных изысканий позволили представить:

– метод управления свойствами магнитно-реологической жидкости внешним магнитным полем;
– модель звена переменной длины с регулируемой жесткостью.

Полученный результат можно использовать при моделировании многозвенных конструкций для создания комфортных экзоскелетов, синхронно взаимодействующих с опорно-двигательным аппаратом человека как

единая человеко-машинная система. Разработка применима для решения значимых социальных и экономических задач.

Ключевые слова: экзоскелет, магнитно-реологическая жидкость, звено переменной длины, регулируемая жесткость, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, напряженность магнитно-реологической жидкости, магнитный момент.

Благодарности. Авторы выражают признательность рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Финансирование. Исследование проводилось при финансовой поддержке Российского научного фонда. Грант № 22–21–00491, https://rscf.ru/project/22-21-00491/

Для цитирования. Разработка методов управления свойствами магнитно-реологической среды с целью регулирования жесткости звена переменной длины экзоскелета / А. О. Блинов, А. В. Борисов, Л. В. Кончина [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 296–305. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305

Original article

Development of Properties Control Methods for Magnetorheological Medium to Regulate the Stiffness of Exoskeleton Variable-Length Link

Alexander O. Blinov[1] ✉, **Andrey V. Borisov**[1], **Larisa V. Konchina**[1], **Marina A. Novikova**[1], **Anatoly V. Chigarev**[2]

[1] National Research University "MPEI", Smolensk Branch, 1, Energeticheskii proezd, Smolensk, Russian Federation

[2] Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Avenue, Minsk, Republic of Belarus

✉ alex-blinov67@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article investigated one of the problems of creating exoskeletons — controlling the properties of magnetic rheological fluid in links of variable length with adjustable stiffness. Based on the research of domestic and foreign authors, the development and urgency of the topic was evaluated. The disadvantage of known exoskeleton models has been specified, i.e., the use of absolutely solid links, whose dynamics does not convey the dynamics of the human musculoskeletal system. The scientific research aimed at the formation of a new direction in the development of exoskeletons that accurately simulate the biomechanics of movements.

Materials and Methods. Different states of structures of variable-length links with a magnetorheological fluid were studied. It has been noted that the links work on the principle of magnetic shock absorbers and consist of a piston rod, electromagnetic coils, and a housing filled with magnetorheological fluid. The ordering effect of an external magnetic field on the particles of a magnetorheological fluid was visualized and mathematically presented. The significance of such factors as time, charge density, magnetic field strength, as well as vectors of electric and magnetic induction, electric intensity and electric current density for this system was shown. The input parameter affecting the behavior of the magnetorheological fluid was determined. This was the magnetic field intensity. It was shown that the viscosity of the liquid varied depending on the shape of the magnetic particles (oblong or oblate ellipsoid).

Results. The dependences that were fundamental for solving the task were investigated and visualized. The magnetic field strength and the angle between the vector directed along a straight line connecting the centers of two micron particles, and the vector of the external magnetic field strength were taken as the basic parameters. It was shown how the magnetic moment, voltage and its antisymmetric part depended on them. It was established that to control the properties of a magnetorheological fluid, it was required to change:

– the external magnetic field intensity;

– the angle between the external magnetic field intensity and the orientation vector between the dipoles.

Two values of force were compared: one – for a given link design, and the other — fixed when walking in the lower leg of a person. The consistency of these indicators was established.

Discussion and Conclusion. The scientific research results allowed us to present:

– a method for controlling the properties of a magnetorheological fluid by an external magnetic field;

– a variable-length link model with adjustable stiffness.

The results obtained can be used in modeling multilink structures to create comfortable exoskeletons that interact synchronously with the human musculoskeletal system as a single human-machine system. The development is applicable to solving significant social and economic problems.

Keywords: exoskeleton, magnetorheological fluid, variable-length link, adjustable stiffness, magnetic induction, magnetic field strength, magnetorheological fluid intensity, magnetic moment.

Acknowledgements. The authors would like to thank the reviewers for valuable comments that contributed to the improvement of the article.

Funding information. The study was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation (grant no. 22–21–00491), https://rscf.ru/project/22-21-00491/

For citation. A. O. Blinov, A. V. Borisov, L. V. Konchina, M. A. Novikova, A. V. Chigarev. Development of Properties Control Methods for Magnetorheological Medium to Regulate the Stiffness of Exoskeleton Variable-Length Link. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 296–305. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305

Введение. Ранее выполненное моделирование позволило выявить изменения длин звеньев опорно-двигательного аппарата человека, их размеров, скоростей движения, определить усилия в кинематической цепи [1]. Это позволило сформулировать требования к свойствам и режимам функционирования звена экзоскелета, повторяющего основные биомеханические свойства соответствующего звена пользователя. Цель исследования заключается в разработке модели звена переменной длины с регулируемой жесткостью для создания комфортных экзоскелетов нового поколения, адекватно воспроизводящих действия опорно-двигательного аппарата человека. Экзоскелеты используют в медицинских и восстановительных центрах для вертикализации положения тела пациента, в космонавтике при создании скафандров и реабилитационных костюмов.

Для управления моделями звеньев с регулируемой жесткостью можно использовать магнитные поля, действующие на магнитно-реологическую среду. Экзоскелеты с регулируемой жесткостью звеньев переменной длины обеспечат устойчивые, безопасные, удобные локомоции человека. Реализация в таких моделях приводов для управляемого изменения конфигураций представляет практическую ценность, что определяет актуальность исследования.

С 2010 по 2020 год в базе «Российский индекс научного цитирования» количество публикаций с ключевым словом «экзоскелет» увеличилось в 10 раз (было менее 50 стало более 500). С 2015 года растет число патентов на экзоскелеты и их компоненты, чаще регистрируется профильное программное обеспечение. В настоящее время нет данных о звеньях экзоскелетов переменной длины с регулируемой жесткостью. Упоминаются решения с мягкими электрическими насосами и пневматическим кольцевым генератором, однако в них не применяются магнитно-реологические жидкости[1]. Есть описание актуатора с магнитно-реологической жидкостью, вязкость которой меняется под действием магнитного поля [2–4][2]. Предлагается использовать магнитно-реологические материалы для создания приводов экзоскелетов[3]. В [4–6] изучено применение магнитно-реологической жидкости при создании привода для коленного сустава экзоскелета. Крутящий момент в этом суставе оказывает демпфирующее действие при ходьбе [7]. В [8–9] рассматриваются магнитно-реологические приводы. Пока не разработан экзоскелет, звенья которого можно регулировать по длине и жесткости.

Материалы и методы. Предполагается, что звено экзоскелета будет работать по принципу магнитных амортизаторов [10]. Звено состоит из штока с поршнем *AE*, корпуса *CB*, заполненного магнитно-реологической жидкостью, и электромагнитных катушек (рис. 1).

[1] Мягких роботов оснастили электрофлюидными логическими схемами // planet-today.ru : [сайт]. URL: https://planet-today.ru/novosti/nauka/item/110728-myagkikh-robotov-osnastili-elektroflyuidnymi-logicheskimi-skhemami (дата обращения: 10.09.2022).

[2] Psomopoulou E. A Simple Controller for a Variable Stiffness Joint with Uncertain Dynamics and Prescribed Performance Guarantees // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 5071–5076. https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385859

[3] Chen J., Liao W. Design and control of a Magnetorheological actuator for leg exoskeleton // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2007. P. 1388–1393. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2007.4522367

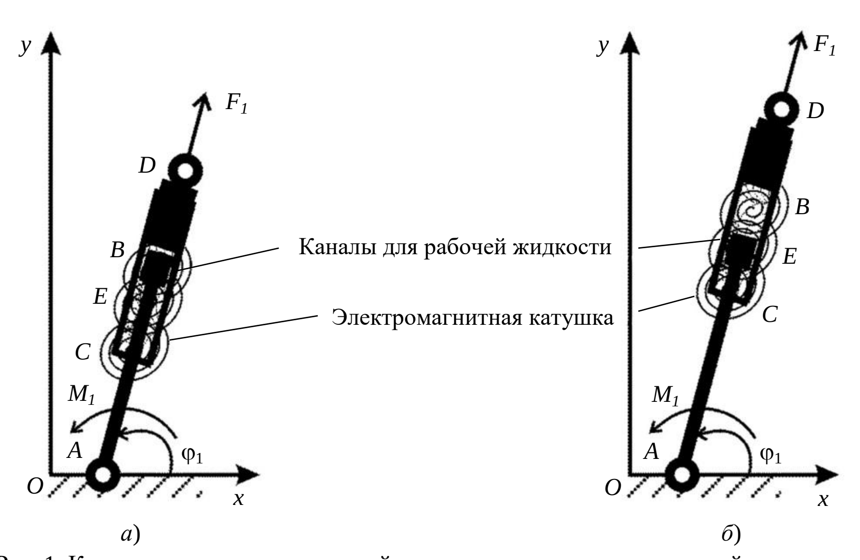


Рис. 1. Конструкция звена переменной длины с магнитно-реологической жидкостью:
а — звено в сжатом состоянии в фазе опоры на него; *б* — звено в растянутом состоянии в фазе переноса (рисунок авторов)

В точках A и D расположены шарниры, обеспечивающие соединение и относительный поворот звеньев в экзоскелете. Магнитное поле создается за счет электромагнитной катушки и воздействует на магнитно-реологическую жидкость внутри звена. Магнитные частицы жидкости под влиянием электромагнитного поля упорядочиваются, и реологические свойства меняются.

Свойства магнитно-реологической жидкости обусловлены поляризацией, поэтому магнитные частицы выстраиваются вдоль силовых линий (рис. 2).

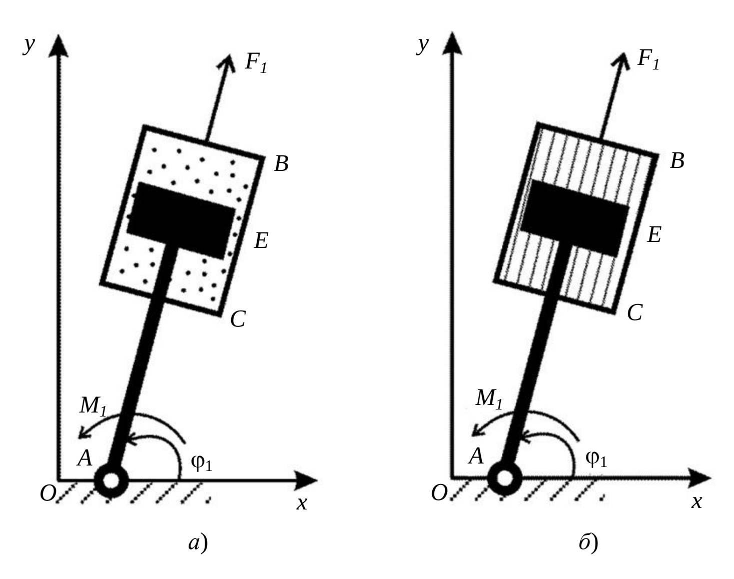


Рис. 2. Частицы магнитно-реологической жидкости в цилиндрической части звена: *а* — магнитные частицы расположены случайным образом без приложения внешнего магнитного поля; *б* — выстроившиеся цепочки ориентированных магнитных частиц вдоль силовых линий под действием внешнего магнитного поля (рисунок авторов)

Под влиянием внешнего электромагнитного поля в магнитно-реологической жидкости возникают поляризация и намагниченность. Для такой жидкости уравнения Максвелла имеют вид:

$$rot\vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, div\vec{B} = 0,$$
$$rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t}, div\vec{D} = \rho_e. \quad (1)$$

Здесь $\vec{D}$ — вектор электрической индукции; $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции; t — время; $\vec{E}$ — вектор электрической напряженности; $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля; ρ_e — плотность зарядов; $\vec{j}$ — вектор плотности электрического тока.

Вектор плотности электрического тока связан с напряженностью электрического поля:

$$\vec{j} = \gamma \times \vec{E}, \quad (2)$$

где γ — удельная проводимость вещества.

Магнитная частица в магнитно-реологической жидкости — это диполь, то есть система двух равных по модулю разноименных зарядов Q, расположенных на расстоянии l друг от друга. Момент пары сил, действующий со стороны поля на элементарный диполь, равен:

$$\vec{M}_d = \vec{d} \times \vec{H}, \quad (3)$$

где $\vec{d}$ — элементарный дипольный момент.

$$\vec{d} = |Q|\vec{l}, \quad (4)$$

где $\vec{l}$ — плечо диполя — вектор, проведенный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между зарядами l.

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ связан с вектором намагниченности $\vec{M}$, характеризующим с макроскопической точки зрения упорядоченное распределение в теле магнитных диполей:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}). \quad (5)$$

При малых значениях намагниченности он прямо пропорционален напряженности магнитного поля:

$$\vec{M} = \chi\vec{H}. \quad (6)$$

После преобразований:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (7)$$

где $\chi = \mu - 1$ — магнитная восприимчивость вещества; $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$Гн/м [11] — абсолютная магнитная проницаемость в вакууме; μ — относительная магнитная проницаемость.

Для магнитной восприимчивости вещества χ в работах [11–13] приводятся результаты экспериментальных исследований магнитно-реологической жидкости на основе керосина с различной концентрацией частиц магнетита в диапазоне $\chi \in [1{,}04; 9{,}20]$ при относительной концентрации $\varphi \in [0{,}211; 1]$.

Таким образом, входной параметр, определяющий поведение магнитно-реологической жидкости, — это напряженность магнитного поля $\vec{H}$, которая создается катушкой, намотанной на элемент звена переменной длины. Напряженность поля — кусочно-заданная ступенчатая функция. Магнитно-реологические жидкости намагничиваются в относительно малых магнитных полях $H \in [100; 100\,000]$ А/м.

Пусть магнитно-реологическая жидкость во время перемещения штока внутри корпуса звена (рис. 2) реализует простое сдвиговое течение с градиентом скорости $\dot{\gamma}$, а напряженность внешнего магнитного поля $\vec{H}$ направлена под углом ψ к градиенту скорости течения. Предположим, что магнитные частицы имеют форму эллипсоидов с отношением двух полуосей $\frac{a}{b} = 2$ и $b = c$.

Напряженность магнитно-реологической жидкости может быть оценена по результатам, полученным в работах [12–14]:

$$\begin{gathered} \sigma = \sigma_s + \sigma_a, \\ \sigma_a = \frac{\varphi_L \Gamma_m}{2n_c \nu_L}, \\ \sigma_s = n_f\dot{\gamma}\Big\{1 + \varphi_L + \Big[\alpha_n + \frac{1}{2}(\zeta_n + \beta_n\lambda_n) + \\ + \frac{1}{2}\beta_n\cos(2\theta_n) + (\chi_n - 2\beta_n\lambda_n)sin^2(\theta_n)\cos^2(\theta_n)\Big]\Big\}. \end{gathered} \quad (8)$$

Здесь σ_s — симметричная компонента напряжения; σ_a — антисимметричная компонента напряжения; φ_L — объемная доля микронных частиц, равная $\varphi_L = 0{,}0127$; n — число частиц в цепочке; n_c — максимальное число частиц в цепочке; α_n, …, λ_n — кинетические коэффициенты, приведенные в работах [12, 13]; Γ_m — магнитный момент, стремящийся выстроить цепочку частиц вдоль поля; ν_L— объем микронной частицы; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; n_f — вязкость магнитно-реологической жидкости; θ — угол между вектором, направленным вдоль прямой, соединяющей центры двух микронных частиц, и вектором напряженности внешнего магнитного поля.

Как видно из формулы (6), тензор напряжений магнитно-реологической жидкости в магнитном поле несимметричен. Симметричная часть напряжения зависит от вязкости магнитно-реологической жидкости. Направление и величина приложенного внешнего магнитного поля существенно влияют на значение вязкости магнитно-реологической жидкости. Коэффициент вязкости может быть меньше или больше начального значения в зависимости от направления приложенного поля и формы частиц. Данный коэффициент в магнитном поле меняется по двум причинам. Первая связана с заторможенностью вращения частиц в поле, что приводит к увеличению значения коэффициента. Вторая — ориентирующее влияние внешнего магнитного поля на взвешенные частицы. В зависимости от направления поля коэффициент вязкости может уменьшаться или увеличиваться. В качестве примера рассмотрим внешнее магнитное поле, которое приложено вдоль направления течения жидкости. Если ее магнитные частицы имеют форму вытянутых эллипсоидов, то вязкость уменьшается. Если же это сплюснутые эллипсоиды, вязкость увеличивается.

Магнитный момент Γ_m, стремящийся выстроить цепочку частиц вдоль поля, вычислим по формуле [12, 13]:

$$\Gamma_m = 2{,}25\mu_0 H^2 \nu_L (n-1)(\chi_f + 1)\sin\theta\cos\theta. \quad (9)$$

Здесь ν_L — объем микронной частицы; $\nu_L = \pi d_L^3/6$; d_L — диаметр микронной частицы; $d_L = 1\times10^{-6}$ м; θ — угол между вектором, соединяющим центры двух микронных частиц, и вектором напряженности внешнего магнитного поля; χ_f — магнитная восприимчивость несущей феррожидкости (примем, что она постоянна и всегда равна начальному значению $\chi_f = 3{,}05$).

Результаты исследования. Построим график магнитного момента Γ_m от напряженности магнитного поля H и угла θ.

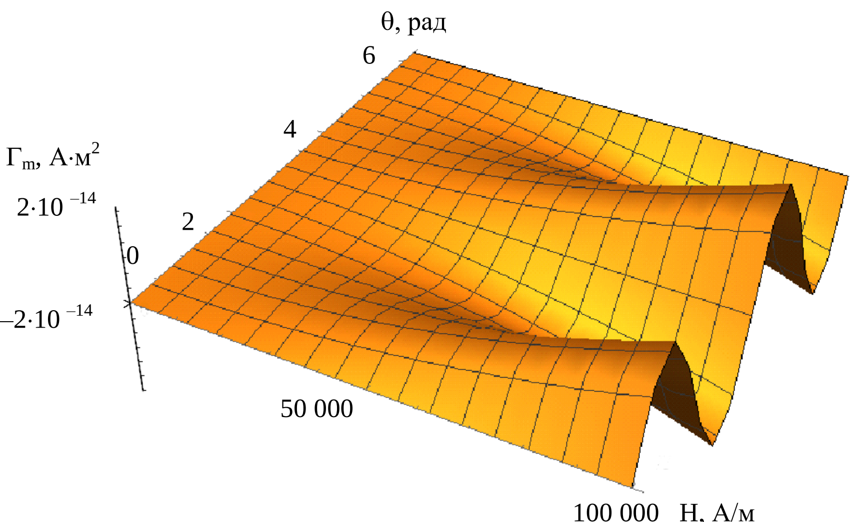


Рис. 3. Зависимость магнитного момента Γ_m от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

По рис. 3 можно судить о поведении магнитного момента Γ_m при различных значениях напряженности магнитного поля и углах между полем и диполями, оценить антисимметричную часть напряжения σ_a. Используя формулы (8) и (9), получим:

$$\sigma_a = \frac{\varphi_L 2{,}25\mu_0 H^2 \nu_L (n-1)(\chi_f + 1)\sin\theta\cos\theta}{2n_c}. \quad (10)$$

Учитывая работы [12–14], в результате решения уравнения при $H = 10^5$ А/м, получим $n_c \approx 60$. Вязкость магнитно-реологической жидкости примем равной $n_f = 1{,}36$ Па · с [11].

Результаты расчетов антисимметричной части напряжения в графическом виде представлены на рис. 4.

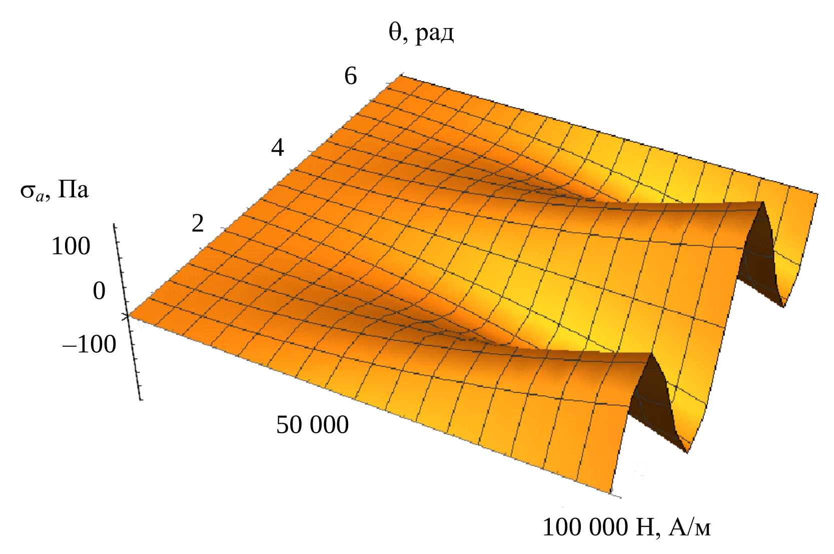


Рис. 4. Зависимость антисимметричной части напряжения σ_a от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

График показывает, что с увеличением напряженности приложенного внешнего магнитного поля напряженность магнитно-реологической жидкости монотонно увеличивается с учетом угла θ. Зависимость σ_a от угла θ показывает, что напряженность магнитно-реологической жидкости достигает:

– максимальных значений при углах, кратных $\frac{\pi}{4}$;

– нулевых значений при углах, кратных $\frac{\pi}{2}$.

Рассмотрим симметричную часть напряжения σ_s. В (8) для него есть кинетические коэффициенты. Вычислим их по выражениям из работ [12, 13], где они показаны в аналитическом виде. Число частиц в цепочке примем равным $n = 30$ как среднее арифметическое, исходя из оценки максимального количества частиц. Определим качественно, в первом приближении скорость сдвига $\dot{\gamma}$ между внешним слоем жидкости около стенки корпуса звена и внутренним слоем около штока. При этом будем исходить из требований, предъявляемых к конструкции звена экзоскелета для модели голени человека. В данном случае речь идет о максимальном значении скорости изменения длины голени человека, с которой должно синхронно работать звено экзоскелета. Согласно [15] скорость изменения длины голени $\dot{l} =$ 0,6 м/с. Расстояние между корпусом и штоком звена предполагается равным d = 0,01 м. Тогда скорость сдвига $\dot{\gamma} = 60\ c^{-1}$. Это не противоречит результатам других авторов: $\dot{\gamma} \in [0; 100]\ c^{-1}$. В дальнейшем такая оценка потребует уточнения на основе экспериментов, т. к. в литературных источниках не обнаружены решения или результаты экспериментов, подходящие для моделирования экзоскелетов или антропоморфных роботов.

Результаты расчетов симметричной части напряжения представлены в графическом виде на рис. 5.

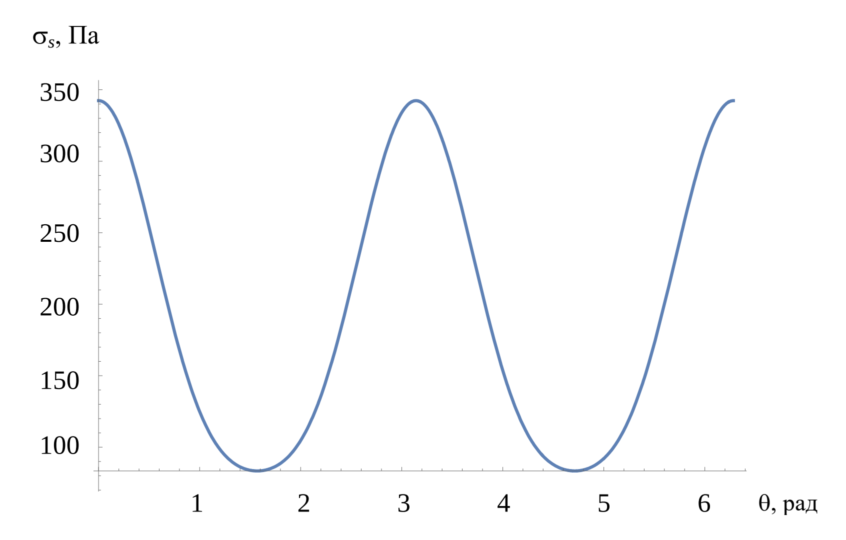


Рис. 5. Зависимость симметричной части напряжения σ_s от угла θ (рисунок авторов)

Напряженность магнитно-реологической жидкости как сумма симметричной и антисимметричной частей представлена на рис. 6. Ее сечение при фиксированном значении напряженности магнитного поля — на рис. 7.

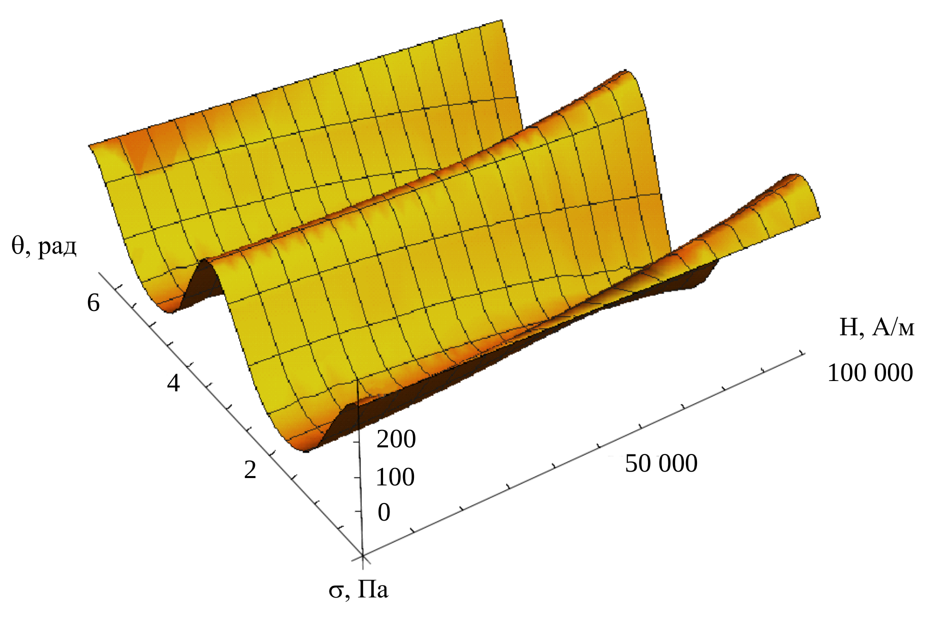


Рис. 6. Зависимость напряжения σ от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

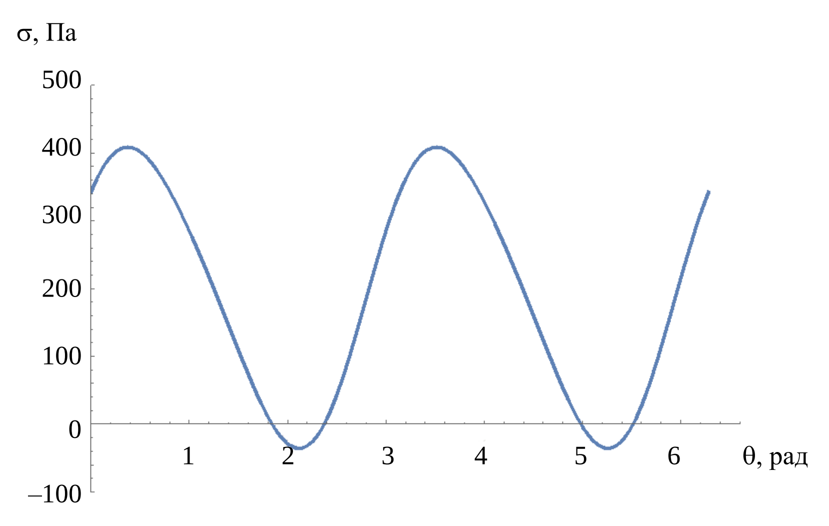


Рис. 7. Зависимость напряжения σ от угла θ при фиксированном значении напряженности магнитного поля $H = 10^5$ А/м (рисунок авторов)

Максимальное значение $\sigma_{max} = 408{,}6$ Па достигается при $\theta = 0{,}37$ рад. Таким образом, для управления свойствами магнитно-реологической жидкости необходимо менять угол между напряженностью внешнего магнитного поля и вектором ориентации между диполями. Также необходимо менять напряженность внешнего магнитного поля.

Внутренний диаметр корпуса, в котором расположен шток, примем равным $D = 0{,}2$ м. В первом приближении предположим, что вычисленные напряжения являются нормальными. Теперь можно определить силу, с которой действует магнитно-реологическая жидкость в звене переменной длины с регулируемой жесткостью:

$$F_{mrf} = \sigma A = \frac{\sigma\pi D^2}{4}. \quad (11)$$

На рис. 9 представлен график, построенный при фиксированном значении напряженности магнитного поля H для двух управляющих параметров: H и угла θ (рис. 8).

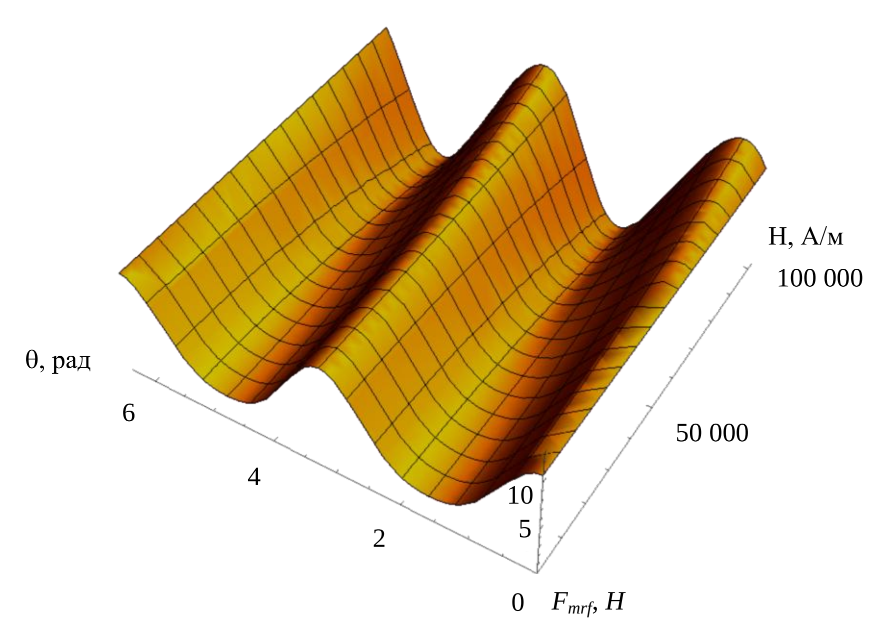


Рис. 8. Зависимость силы F_{mrf} от напряженности магнитного поля H и угла θ (рисунок авторов)

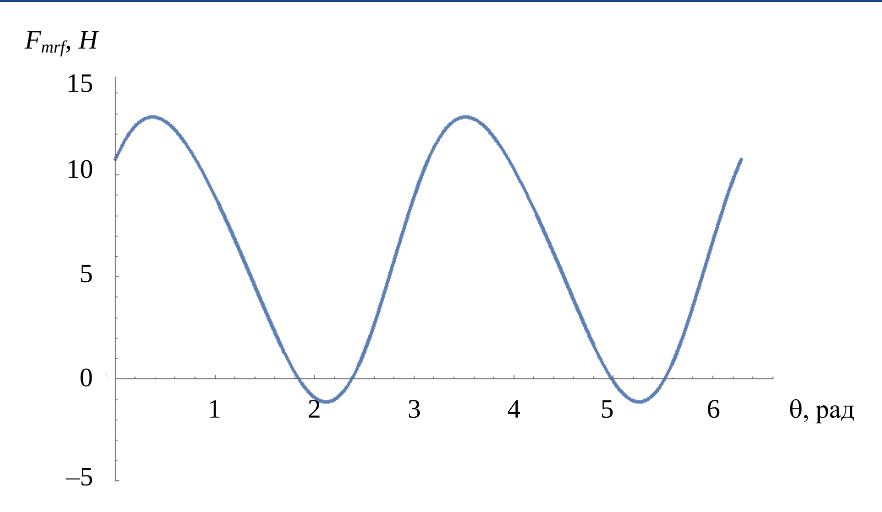


Рис. 9. Зависимость силы F_{mrf} от угла θ при фиксированном значении напряженности магнитного поля $H = 10^5$ А/м (рисунок авторов)

Максимальное значение ${F_{mrf}}_{max} = 12{,}8$ Н достигается при θ = 0,37 рад. Это соответствует значениям, при которых, согласно [14], функционирует звено экзоскелета. Для дальнейшего увеличения силы со стороны магнитно-реологической жидкости необходимо повысить напряженность внешнего магнитного поля.

Итак, чтобы частицы ориентировались вдоль линий поля требуемым образом, нужно приложить магнитное поле соответствующей напряженности и ориентации.

Обсуждение и заключения. Итоги научных изысканий позволяют предложить метод управляющего воздействия внешнего магнитного поля на свойства магнитно-реологической жидкости. Впервые предложена модель звена переменной длины экзоскелета с регулируемой жесткостью, которая функционирует благодаря магнитно-реологической среде. Концепцию можно использовать для создания:

– комфортных экзоскелетов со звеньями переменной длины, шарнирами и связями;

– скафандров и аналогичного специального снаряжения;

– транспортных систем в виде антропоморфных роботов, обеспечивающих удобное перемещение в условиях пересеченной местности.

Широкое применение антропоморфных робототехнических систем нового поколения (биомехатронных моделей, синхронизированных с движениями опорно-двигательного аппарата человека) решит важные социальные и экономические задачи:

– повысит качество жизни людей с ограниченными двигательными возможностями;

– будет способствовать развитию высоких технологий в различных отраслях отечественной промышленности.

Список литературы

1. Borisov, A. V. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons / A. V. Borisov, I. E. Kaspirovich, R. G. Mukharlyamov // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2021. — Vol. 60. — P. 827–841. https://doi.org/10.1134/S106423072104002X

2. Bougrinat, Y. Design and Development of a Lightweight Ankle Exoskeleton for Human Walking Augmentation / Y. Bougrinat, S. Achiche, M. Raison // Mechatronics. — 2019. — Vol. 64. — Art. 102297. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.102297

3. Jinzhou Chen. Design, Testing and Control of a Magnetorheological Actuator for Assistive Knee Braces / Jinzhou Chen, Wei-Hsin Liao // Smart Materials and Structures. — 2010. — Vol. 19. — Art. 035029. 10.1088/0964-1726/19/3/035029

4. Carlson, J. Magnetorheological Fluid Actuators / J. Carlson // In book: Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications / Hartmut Janocha (ed.) — Saarbrücken : Springer, 1999. — P. 180–195.

5. Ahmadkhanlou, F. A Magnetorheological Fluid-Based Controllable Active Knee Brace / F. Ahmadkhanlou, J. L. Zite, G. N. Washington // Proceedings SPIE. — 2007. — Vol. 6527. — Art. 652700. https://doi.org/10.1117/12.715902

6. Dollar, A. M. Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art / A. M. Dollar, H. Herr // IEEE Transactions on robotics. — 2008. — Vol. 24. — P. 144–158. 10.1109/TRO.2008.915453

7. Design and Control of a Polycentric Knee Exoskeleton Using an Electro-Hydraulic Actuator / Taesik Lee, Dongyoung Lee, Buchun Song, Yoon Su Baek // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — P. 211. https://doi.org/10.3390/s20010211

8. Laflamme, S. Online Learning Algorithm for Structural Control Using Magnetorheological Actuators / S. Laflamme. — Massachusetts : Institute of Technology, 2007. — 88 p. — URL: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39271/170931934-MIT.pdf?sequence=2

9. A Kinematic Model of a Humanoid Lower Limb Exoskeleton with Hydraulic Actuators / S. Glowinski, T. Krzyzynski, A. Bryndal, I. Maciejewski // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — P. 6116. https://doi.org/10.3390/s20216116

10. Юсупбеков, Х. А. Активные подвески автомобиля с амортизаторами переменной жесткости / Х. А. Юсупбеков, М. М. Собиров, А. Р. Юлдашев // Наука, техника и образование. — 2020. — № 2 (66). — С. 18–27.

11. Lebedev, A. V. Viscosity of Magnetic Fluids Must Be Modified in Calculations of Dynamic Susceptibility / A. V. Lebedev // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — Vol. 431. — P. 30–32. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.110

12. Зубарев, А. Ю. К нелинейной реологии магнитных жидкостей / А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Искакова, Д. Н. Чириков // Коллоидный журнал. — 2011. — Т. 73, № 3. — С. 320–333.

13. Зубарев, А. Ю. Магнитореологические свойства феррожидкостей с кластерными частицами / А. Ю. Зубарев, Д. Н. Чириков // Коллоидный журнал. — 2013. — Т. 75, № 5. — С. 567–576.

14. Applying the Models of Magneto-Rheological Substances in the Study of Exoskeleton Variable-Length Link with Adjustable Stiffness / A. Blinov, A. Borisov, L. Konchina, M. Novikova // Journal of Applied Informatics. — 2022. — Vol. 17. — P. 133–142. https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142

15. Borisov, A. V. Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control / A. V. Borisov, A. V. Chigarev. — Cham : Springer, 2022. — 232 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97733-7

Поступила в редакцию 19.09.2022.
Поступила после рецензирования 20.10.2022.
Принята к публикации 20.10.2022.

Об авторах:

Блинов Александр Олегович, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), ORCID, alex-blinov67@yandex.ru

Борисов Андрей Валерьевич, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), доктор физико-математических наук, доцент, ScopusID, ORCID, BorisowAndrej@yandex.ru

Кончина Лариса Владимировна, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID, la_kon@mail.ru

Новикова Марина Александровна, старший преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование» Национального исследовательского института «МЭИ» (214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1), ORCID, mar.novikova@ro.ru

Чигарев Анатолий Власович, профессор механико-математического факультета Белорусского государственного университета (220030, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID, chigarevanatoli@yandex.by

Заявленный вклад соавторов:

А. О. Блинов — постановка цели и задачи исследования, проведение расчетов, построение графиков, подготовка текста, формулирование выводов. А. В. Борисов — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Л. В. Кончина — составление системы дифференциальных уравнений в частных производных и запись соотношений, определяющих поведение магнитно-реологической жидкости. М. А. Новикова — графическое изображение звена экзоскелета переменной длины с регулируемой жесткостью и его функционирования, подбор численных параметров модели. А. В. Чигарев — формирование основной концепции, участие в анализе результатов и подготовке выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.